특집

지열에너지 기술 현황

박 차 식
호서대학교 자동차공학과 교수

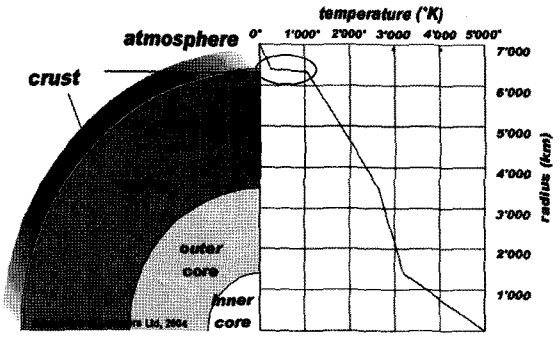
1. 서 론

지열을 이용한 예를 오랜 과거에서부터 찾아볼 수 있다. 신라는 오래전부터 얼음을 저장하여 사용하였는데, "삼국유사"에 의하면 신라 제3대 유리왕 때부터 얼음을 저장하여 사용하였으며, "삼국사기"에는 지증왕 6년 11월에 유사에게 명하여 얼음을 저장하도록 하였다는 기록이 나타난다. 이것이 바로 석빙고인데 현재의 석빙고가 지어진 연대에 대해서는 조선시대에 지어진 것이라는 견해와 신라시대에 축조한 것을 현 위치로 옮겼다는 신라시대 축조설(築造說) 두 가지 견해가 있다. 현존하는 것은 모두 조선시대에 촉조된 것이며 그 구조가 거의 비슷하다. '겨울에 얼음을 땅속 깊은 곳에 저장하였다가 임금님께 진상하였다.'라는 과거 역사 문헌 기록에서 알 수 있듯이 김칫독이나 기장 채소등을 땅속에 묻어 적정한 온도를 유지해 보관한 것은 옛 선조들의 지열을 활용한 지혜이다.

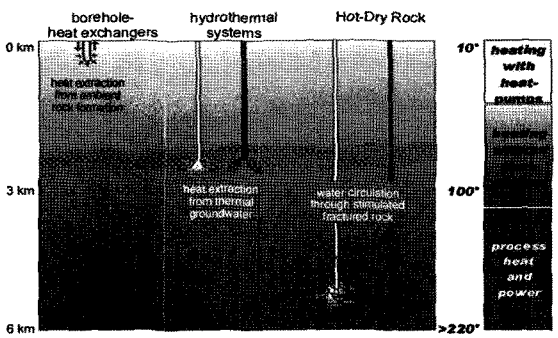
최근에는 1970년대 에너지 파동 이후 선진국을 중심으로 에너지 절약 및 대체에너지 개발, 보급에 관한 활발한 연구가 진행되었다. 그 결과에 의하여 많은 대체에너지 관련 기술과 고효율 설비 제품들이 쏟아져 나왔다. 그 중에서 특히 각종 산업시설 및 생활과정에서 발생하는 여러 자연에너지를 효과적으로 이용하기 위한 응용기술들이 발달되었다. 여기서는 지중 깊이에 따른 지열에너지를 분류하고 이에 따른 적용 기술현황을 기술하였다.

2. 지열에너지의 분류

지열은 지구 중심인 맨틀 부위의 핵분열로 발생

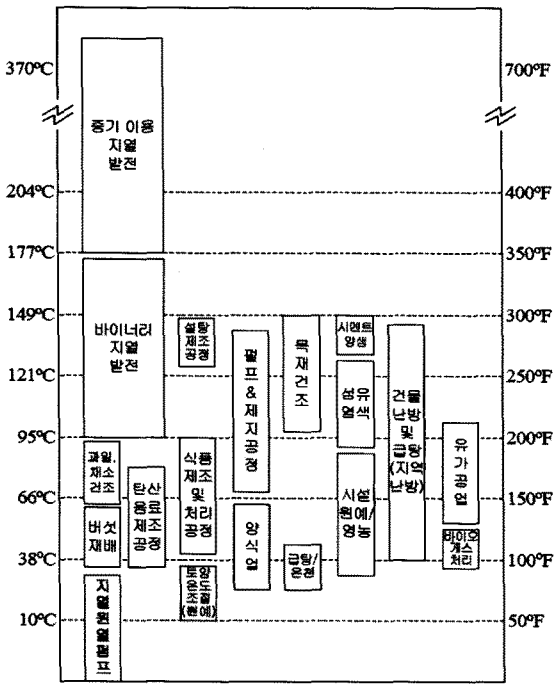


[그림 1] 지구 내부 온도 구배



[그림 2] 깊이에 따른 지열에너지 정의

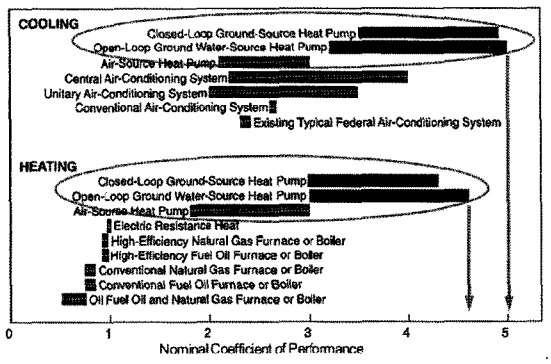
하는 열과 태양 복사열이 지구에 축적된 것이다. 이 때 지구는 거대한 촉매 역할을 한다. 지열은 지표에서부터 깊이에 따라 다양한 온도분포 특성을 나타내는데 이를 활용하면 우수한 열원으로서의 가치가 충분히 있다. **그림 1**은 지구 내부온도구배 특성을 나타낸다. 지구 내부는 지각, 맨틀, 외핵, 내핵으로 이루어져 있다. 지각은 지구의 겉부분을 둘러싸고 있는 부분으로 대륙지각의 경우 평균 두께가 약 35 km로 화강암질 암석으로 되었고 해양지각의 경우 평균 두께가 약 5 km의 현무암질 암석으로 되어 있다. 맨틀은 모호면에서 지하 2900 km까지의 부분으로 지구 전체 부피의 약 80%를 차지하고 있고 상부 맨틀과 하부 맨틀로 구분한다. 그리고 마지막으로 핵은 2900 km에서부터 중심부까지를 말한다. 지구 내부의 에너지원은 70%의 에너지가 지구 속 암반의 방사성 원소의 붕괴로부터 발생하고 나머지 대부분은 지구 내부의 핵에너지로서 지구 생성과정에서의 외부 수축으로 지구 내부에 남겨진 잔류 에너지 이다.



[그림 3] Lindal Diagram

우리가 소위 지열에너지로 이용하는 부분은 지각 부분으로 그 깊이에 따른 지열에너지를 정의하면 **그림 2**와 같이 나눌 수 있다. 일반적으로 지표에서 200 m 정도까지의 깊이를 천부지열(Shallow geothermal)로 정의하며 이 부근에서의 온도는 10 ~ 20℃를 나타낸다. 이 온도 범위에서는 냉방이나 난방 또는 급탕으로 직접적으로 이용할 수 없기 때문에 히트펌프를 이용하여 온도를 승온시키거나 낮추어 사용하게 된다. 지하 200 m 이상의 깊이에서부터 수 km 깊이까지는 심부지열(Deep geothermal)로 정의하며 이 범위에서의 온도는 40 ~ 150℃를 나타낸다. 깊이에 따라 온도가 100℃ 이하의 경우에는 바로 난방이나 급탕으로 사용가능한 열원으로 이용하고 100℃ 이상의 온도범위에서는 발전용(Geothermal power plant)으로 사용한다.

그림 3은 잘 알려진 Lindal 선도(Lindal diagram)로서 지중 온도대별 지열에너지의 활용 범위를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 온도에 따른 지열 에너지 기술은 크게 직접 이용 기술과 간접 이용 기술로 분류할 수 있다. 직접 이용은 땅속의 중저온 에너지를 앞서 기술한 바와 같이 히트펌프와 같은 에너지 변환기기를 사용하여 건물 냉난방, 각종 건조 산업, 도로 융설, 온천, 양식업 및 시설영농, 지역 난방 등에 활용하는 기술을 말한다. 간접 이용 기술은 Lindal 선도의 상부에 위



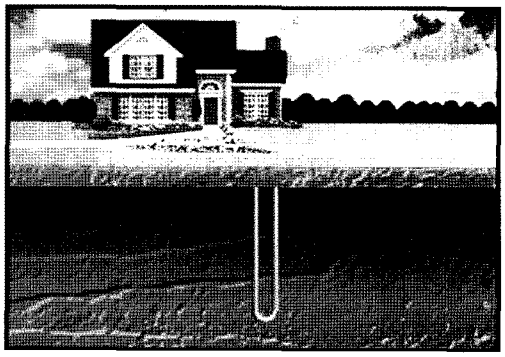
[그림 4] 지열열펌프 시스템과 기존 냉난방 설비의 효율 비교

치하는 것으로 80℃이상의 고온수를 끌어올려 전기를 생산하기 위한 지열발전에 활용하는 기술을 말한다.

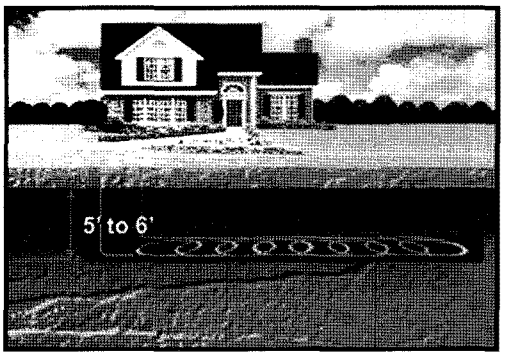
현재 국내에서 지열 기술이라고 하면 주로 천부지열을 이용하여 건물을 냉난방하거나 온수를 공급하는 지열 열펌프 시스템 기술로 한정하는 하는 경향이 있다. 이것은 기존의 국내에서 지열에너지 활용에 대한 다양한 분야와 적용 기술력의 부재와 상대적으로 인프라가 잘 구축된 공조냉동산업에 지열 에너지를 연계하는 것이 비교적 쉬웠기 때문이다. 그러나, 최근에 천공기술의 발달과 더불어 지하 수천미터 속 고온열을 이용하여 전기를 생산하는 심부지열발전에 대한 논의가 활발이 진행되고 있다.

3. 지열 히트펌프 시스템

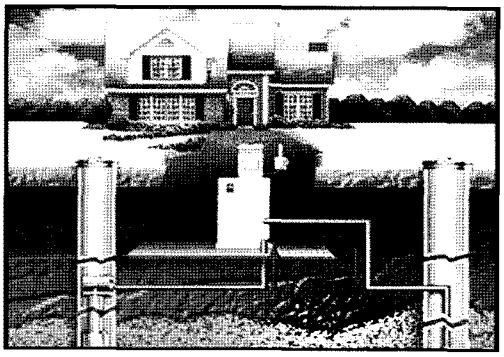
지열 열펌프 시스템은 크게 지중열교환기와 열펌프로 구성된 냉난방 겸용 시스템이다. 즉, 냉방시에는 건물 내의 열을 지중으로 방출하고, 난방과 급탕 시에는 지중의 열을 실내와 온수에 공급함으로써 하나의 시스템으로 공간 냉난방과 온수, 급탕을 동시에 구현할 수 있다. 냉방과 난방모드에서 각각 냉열원과 온열원의 역할을 하는 지중온도는 연중 안정적이기 때문에 지열 열펌프 시스템은 높은 효율과 우수한 성능을 갖는다. 따라서 기존 냉난방 설비나 공기열원 열펌프 시스템과 비교했을 때, 효율이 높고 성능이 우수한 시스템으로 알려져 있다. 미국 환경보호청(EPA)은



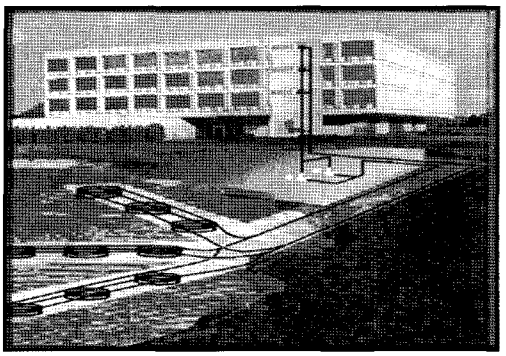
〈수직형〉



〈수평형〉



〈지하수열원〉



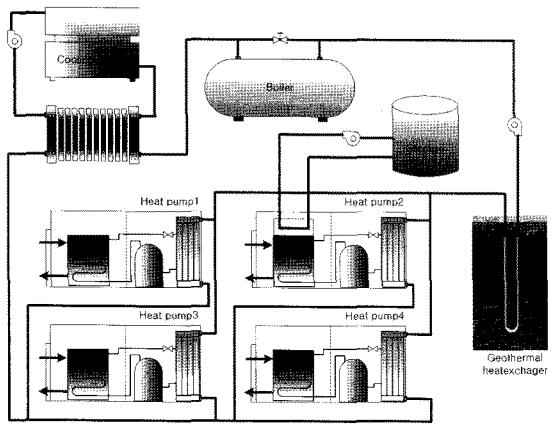
〈지표수 열원〉

[그림 5] 지열 열교환기 배치에 따른 분류

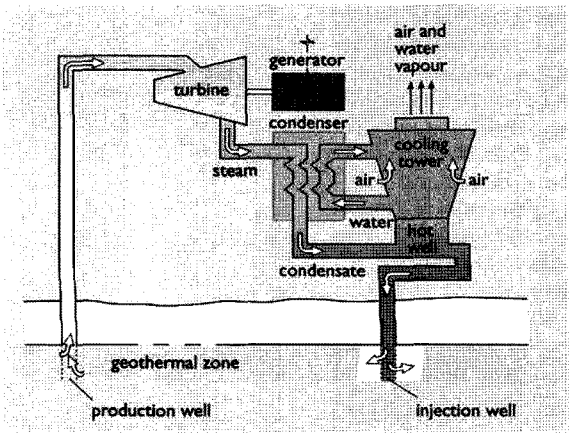
현존하는 냉난방 기술 중에서 가장 에너지 효율적이고 환경 친화적이며, 비용 효과가 우수한 공기조화 시스템으로 지열 열펌프 시스템을 예로 들고 있다. **그림 4**에서 나타내는 바와 같이 미국 에너지부(DOE)에서 발표한 내용에 따르면 기존 냉난방 설비의 효율과 비교해 볼 때 전체 시스템 중에서 지열 열펌프 시스템의 냉난방 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

그림 4 지열열펌프 시스템과 기존 냉난방 설비의 효율 비교 지열 히트펌프 시스템의 종류는 구조에 따른 구분은 개방형과 밀폐형 시스템으로 크게 나눌 수 있다. 개방형 시스템의 경우 지하수나 지표수를 직접 순환시키기 때문에 효율은 높지만, 지하수나 토양 오염문제 등을 야기할 수 있다. 반면 밀폐형 시스템은 다양한 용량으로 시공할 수 있지만 초기 투자비와 효율 면에서 개방형 시스템보다 다소 떨어지는 단점이 있다. 지열 히트펌프 시스템을 열원에 따라 구분하면 토양열원, 지하수열원, 지표수열원, 그리고 하이브리드 열원 히트펌프로 구분할 수 있다. 토양열원 히트펌프 시스템은 다시 지중열교환기의 매설 형태에 따라 수직형과 수평형 시스템으로 분류된다. 수직형 지중열교환기는 지중에 수직으로 매설되기 때문에 시공부지의 제약이 상대적으로 적고 건물의 부하 및 부지조건에 따라 다양한 깊이로 시공이 가능하다. 수평형 지중열교환기의 경우에는 시공비용이 수직형에 비해 상대적으로 저렴하지만 지중열교환기를 매설할 수 있는 충분한 부지를 필요로 한다. 또한 지중온도와 지중열물성치 등이 계절이나 연간 강우량 등에 의해 영향을 받기 때문에 시스템 효율은 수직형 시스템보다 다소 낮다. 지하수열원 히트펌프 시스템은 양질의 지하수가 풍부할 때 이를 열원이나 히트싱크로 활용하는 시스템이다. 시스템 효율이 높지만 지하수에 포함된 오염물질은 배관이나 열교환기에 파울링 또는 스케일 등에 문제로 효율이 저하될 수 있다. 지표수열원 히트펌프 시스템은 자연연못, 인공연못, 호수, 저수지, 원수 등을 열원으로 활용한다. 연못이나 호수의 크기가 작을 경우에는 외기온도 변화에 영향을 받아 시스템 효율이 감소할 수도 있다. **그림 5**는 지중 열교환기 배치에 따른 설치 예를 나타낸다.

지중열교환기 설치를 위한 부지 및 설치비용 면에서 제약을 받을 경우에는 하이브리드 열원 히트펌프 시스템을 적용한다. 이 시스템은 보조 냉열원으로 냉각탑 등을 적용하고 온열원으로는 보일러나 태양열 집열판 등을 병행하여 설치함으로써 지중열교환기의 제약문제를 해결할 수 있다. **그림 6**은 보조열원을 병용하는 하이브리드 히트펌프 시스템의 개략도를 나타낸다. 냉방시에는 냉



[그림 6] 하이브리드 히트펌프 시스템 개략도



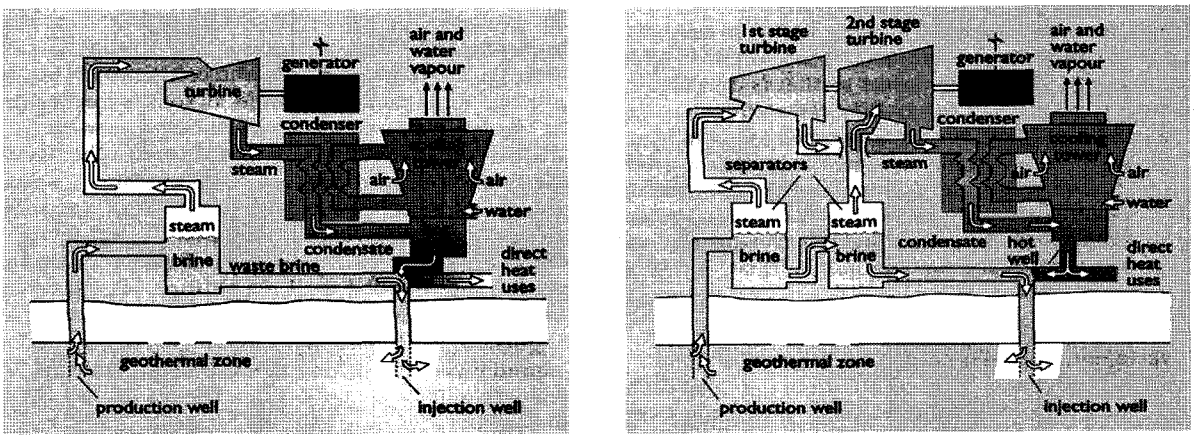
[그림 7] 건조증기 방식 지열 발전 시스템

각탑과 판형열교환기를 지중열교환기 앞단에 설치를 하여 지중열교환기의 부하를 줄여줄 수 있도록 설계하여 냉방용량이 초과되면 용량을 냉각탑을 가동하여 충족시키게 된다. 즉, 설계시에 정해진 수준의 냉방부하까지는 지중 열교환기를 이용하여 충족시키고 그 수준을 넘어서는 부하에 대해서는 냉각탑을 가동하게 된다. 난방시에는 보조열원으로 보일러를 설치하여 난방열원으로 사용할 수 있도록 하였다.

4. 지열 발전 시스템

최초의 지열 발전에 대한 연구는 이탈리아의 Prince Gionori Conti가 1904년에서 1905년 사이에 하였으며, 최초의 상용 지열 발전소는 1913년 이탈리아의 Larderello에서 가동하였다. 이후 1958년 뉴질랜드의 Wairakei, 1959년 멕시코의 실험 플랜트, 1960년 미국의 상용 플랜트, 1966년에는 일본의 Matsukawa에서 23 MW급 지열 발전이 시작되었다. 이전의 이들 플랜트는 뉴질랜드의 지열 발전소를 제외하고는 모두 지구의 증기를 직접 이용하였다. 1970년에서 1980년 사이 러시아, 아이슬랜드, 엘살바도르, 중국, 인도네시아, 케냐, 터기, 포르투갈, 그리스, 니카라구아 등에서 지열 발전이 보급되었다. 이후 태국, 아르헨티나, 대만, 코스타리카, 오스트리아, 과테말라, 이디오피아 그리고 최근에는 독일, 파푸아뉴기니에 보급되었다. 미국지열에너지협회(GEO)는 2006년 현재 미국에서는 캘리포니아와 유타, 하와이, 네바다 주에서 지열발전을 하고 있고 알래스카와 애리조나 등에 새로운 지열발전소를 건설중이다. 미국 에너지부(DOE) 에너지정보국에 의하면 지열발전량은 미국내 총발전량의 0.35%를 차지한다. 국내에서는 최근 제주에 처음으로 지열발전소를 건립하는 방안이 추진되고 있다. 서울(주)휴스콘건설은 2008년 4월 스위스GEL사와 공동으로 제주혁신도시 내에 지열발전소를 건립을 추진하겠다고 선언했다. 이 회사는 "2007년 4월부터 GEL과 함께 제주 지역을 탐사한 결과, 개발 가능성이 높은 3, 4곳을 확인했다"고 밝혔다.

현재 대부분의 지열발전은 건조증기(Dry steam), 플래시증기(Flash steam), 바이너리(Binary cycle) 방식의 3가지 방법으로 이루어진다. **그림 7**에 나타낸 바와 같이 건조증기 방식은 지중 심부에서 추출한 건조 증기를 이용하여 전기를 생산한다. 관정으로부터 나오는 증기를 발전설비의 터빈으로 직접 보내 발전하는 방식이다. 증기는 응축된 후 지하로 되돌리게 되어 있다. 건



(a) 단일 플래시 방식

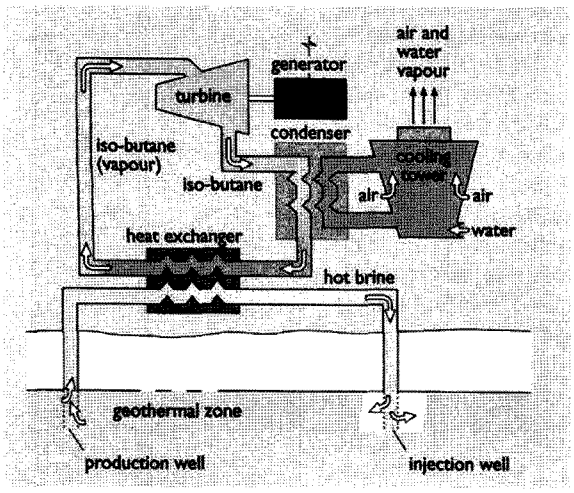
(b) 이중 플래시 방식

[그림 8] 플래시 방식 지열 발전

조증기의 온도는 180 ~ 225℃ 사의 범위이고, 압력은 4 ~ 8 MPa 정도이다. 세계 최대 규모의 The Geyser도 이 방식을 채택하고 있다.

플래시증기 방식은 **그림 8**(a)에 나타낸 바와 같이 가장 일반적인 지열발전의 형태다. 180℃ 이상의 고온의 물을 이용하여 고압 상태에서 추출한 고온수를 양수하여 발전설비의 터빈을 돌린다. 이때 발전설비에 도달한 고온수의 압력을 급격히 낮추면 그 일부가 증기로 변하게 되는데 이 증기를 이용하여 터빈을 돌리는 방식이다. 보통 5 ~ 100 MW 정도 규모의 발전을 하고 시간당 6 ~ 9 톤의 증기를 소요하게 된다. 발전효율을 높이기 위해 최근에는 **그림 8**(b)에 나타낸 바와 같이 이중 플래시 증기방식을 도입하기도 하는데 이것은 플래시되지 않은 증기를 저압탱크로 보낸 후 저압터빈에서 전기를 생산하도록 하는 방식인데 플랜트 제작비용은 약 5% 정도 상승하지만 전기 생산량이 20 ~ 25% 정도 증가하게 된다.

바이너리 방식은 지하에서 추출한 80 ~ 120℃의 중온수를 터빈과 직접 접촉하지 않고 2차 유체를 증발시키는데 이용한다. 이때 열교환기를 이용하고 열교환이 이루어진 2차 유체가 증발하여 터빈을 돌리는 방식이다. 작동유체로는 이소부탄, 이소펜탄, R134a 등이 사용되고 있다. 바이너리 사이클이라는 이름은 이러한 열교환 과정에서 기인하며 유기랜킨 사이클로도 불린다. **그림 9**는 바이너리 방식 지열 발전 시스템을 나타낸다. 이 방식의 장점은 낮은 온도의 지하 심층수를 열원으로 사용할 수 있다는 점이다. 세계에서 저온 발전이 이루어지는 곳은 미국 알래스카의 Chena Hot Spring 지역이다. 이 지역에서는 1998년 처음으로 시추가 이루어진 이래 2004년부터 약 75℃의 지하 심층수를 이용하여 바이너리 지역발전을 하고 있다.



[그림 9] 바이너리 방식 지열 발전 시스템

5. 결 론

미국에서 지열에너지의 사용은 1980년 석유 파동에서 시작하여 1980년대 후반에 피크를 이루다가 1990년대에 쇠퇴하기 시작하여 1992년 이후로는 새로운 개발이 없었다. 그러나 최근에 화석연료의 가격 증대와 온실가스 배출 문제를 해결하기 위한 대체 방법으로 지열에너지의 활용에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 이러한 경향과 유사하게 국내에서도 2002년부터 지열 에너지의 개발이 본격화되었으며 국가 차원에서 지열에너지의 개발과 보급을 주도하고 있다.

지열 히트펌프을 활용한 냉난방 시스템은 외기의 급격한 변화에도 영향을 받지 않고 일정하게 온도를 유지하는 지열을 활용하기 때문에 효율이 높은 에너지 절약형 시스템이다. 특히 우리나라와 같이 여름과 겨울의 구분이 확연한 기후조건에서 활용 가능성이 매우 우수한 시스템이다. 현재 국내 신재생에너지 시장에서 지열이 차지하는 비중은 타 분야에 비해 상대적으로 작지만 점차 지열 시장의 성장세가 커지고 있다. 이러한 분위기를 이어가기 위해서는 지열 히트펌프 보급을 위한 정책과 제도에 대한 정비가 꾸준히 정비되어야 한다고 사료된다. 또한, 국내에서 지열에너지의 활용분야는 건물 냉난방과 관련한 기술 개발과 보급에 집중되어 있는 반면에 심부 지열을 활용한 지열발전 기술의 활용은 거의 없는 상황

이므로 국내 실정에 맞는 지열에너지 발전에도 지속적인 연구와 관심을 기울여야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. 정상진, 이근상, 국내 지열에너지의 사용 현황과 환경 영향, KIC News, 2008, Vol 12(4), pp. 1 ~ 8.
2. 강신형, 최종민, 손병후, 지열원 열펌프 시스템의 종류 및 설치사례, 설비저널, 2009, Vol 38(1), pp. 18 ~ 27.
3. 박성룡, 히트펌프 기술동향 및 전망, 설비저널, 2010, Vol 39(6), pp. 4 ~ 13.
4. 박준택, 국내신재생에너지 보급현황 및 주요 설치 사례, 설비저널, 2010, Vol 39(7), pp. 51 ~ 54.
5. J. W. Lund, Geothermal Energy Focus, 2006, pp. 48 ~ 51.
6. Ebru Kavak Akpinar, Arif Hepbasli, A comparative study on exergetic assessment of two ground source heat pump systems for residential applcations, Building and environment, 2007, 42, pp. 2004-2013.